УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2023.01.054

О. А. ФОКОВ

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОСНОГО ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ОРБІТАЛЬНОГО СЕРВІСУ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна; e-mail: oafokov@ukr.net

Останнім часом задачі оцінювання відносного просторового положення об'єкта орбітального сервісу дослідники приділяють немалу увагу. Визначення відносного положення на близькій відстані все ще залишається відкритим напрямком досліджень, особливо це стосується некооперованих (тих, що не співпрацюють) об'єктів (цілей) сервісного обслуговування. Метою даної праці є огляд сучасного стану проблеми визначення параметрів відносного руху об'єктів орбітального сервісу з акцентом на операціях з некооперованими та невідомими цілями на близький відстані. Методом дослідження є аналіз присвячених цій проблемі публікацій за останнє десятиріччя. У результаті проведеного аналізу було зроблено наступні висновки. Визначення відносного просторового положення некооперованого орбітального об'єкта на основі відеосистем є класичним підходом завдяки перевагам малої ваги та низького споживання енергії. Алгоритми оцінки просторового положення на основі відеокамери зазвичай вимагають попереднього знання особливостей (ознак) цілі. Основними методами оцінки відносного положення залишаються підходи, що спираються на виділення та відповідність ознак зображення для послідовних кадрів або з моделлю цілі. Ще одним основним підходом до визначення відносного положення є навігація на основі датчиків лідар, де поширеними методами також є розпізнавання та відповідність ознак на основі отриманих лідаром хмари точок поверхні цілі. Останнім часом намітилась тенденція до розвитку неознакових методів визначення просторового положення цілі, у тому числі, невідомої. Тривимірна природа даних хмари точок лідара є сприятливою для оцінки положення цілі без наявності її моделі. Стосовно придатності методів оцінювання положення цілі до їх застосування у випадку невідомої цілі відзначається, що реалізація очевидного підходу, заснованого на створенні тривимірної моделі цілі на орбіті шляхом обробки серії зображень, що передує процесу оцінювання її просторового руху, потребує багато часу, що є критичним в операціях безпосередньої близькості. Тенденцією оцінювання просторового положення цілі є розробка методів одночасної оцінки просторового положення та форми невідомого об'єкта. Загалом випадок невідомого об'єкта на даний час не є дослідженим у повній мірі.

Ключові слова: *методи визначення відносного просторового положення, орбітальний сервіс, некооперований об'єкт, невідомий об'єкт, методи на основі ознак зображення об'єкта, неознакові методи*.

Recently considerable attention has been paid to the problem of estimating the pose of an on-orbit service object. Determining the pose at a close distance still remains an open line of research, especially for non-cooperative objects (targets) of on-orbit service. The goal of this work is to overview the state of the art in the problem of determining the relative motion parameters of on-orbit service objects with emphasis on close proximity operations with non-cooperative and unknown targets. The method employed is the analysis of publications devoted to this problem over the last decade. The analysis showed the following. Determining the pose of a non-cooperative orbital object using video systems is a classical approach due to the advantages of light weight and low power consumption. Video camera based pose estimation algorithms usually require prior knowledge of the target features. The main methods of pose estimation still involve approaches based on the recognition and correspondence of image features for consecutive frames or with a target model. Another major approach to pose determination is lidar navigation, where the recognition and correspondence of features based on lidar-derived target surface point clouds are also common methods. Recently, a trend has emerged towards the development of non-feature methods for target pose determination, including unknown targets. The three-dimensional nature of lidar point cloud data is favorable for target pose estimation without any target model. As to the applicability of target pose estimation methods to an unknown target, the implementation of the obvious approach based on constructing a three-dimensional model of the target by processing a series of its images prior to estimating its spatial motion takes a lot of time, which is critical in close proximity operations. The trend in target pose estimation is the development of methods for simultaneous estimation of the pose and shape of an unknown object. In general, the case of an unknown object has not yet been fully investigated.

Keywords: *pose determination methods, on-orbit service, non-cooperative object, unknown object, methods based on object image features, non-feature methods.*

Вступ. Одним із напрямків розвитку космічної техніки та забезпечення проведення космічних місій є втілення концепції орбітального сервісного обслуговування космічних апаратів. При цьому важливу роль займають автономні орбітальні операції, що проводяться з боку сервісних апаратів стосовно до інших космічних апаратів або інших цілей. Це можна побачити, зокрема, з детального інженерного огляду здійснених та запланованих місій орбітального сервісу космічних апаратів, що наведений 2019 р. в [1]. У статті [2] 2021 р. теж зазначено, що в останні роки збільшилася кількість задач орбітального сервісу, таких як автоматичне зближення та стикування, видалення космічного сміття з орбіти. Зазначено, що було проведено демонстрації операцій із кооперованими (тими, що співпрацюють) цілями, в той час як завдання обслуговування некооперованих (тих, що не співпрацюють) цілей переважно перебувають у стадії теоретичного дослідження. Здійснення сервісних операцій в автономному режимі накладає жорсткі вимоги до керування відносним просторовим рухом сервісного апарата і об'єкта сервісу та потребує оцінювання відносного просторового положення та параметрів руху об'єкта орбітального сервісу бортовими засобами сервісного апарата.

Останнім часом задачі оцінювання відносного просторового положення об'єкта орбітального сервісу дослідники приділяють немалу увагу. Але, як зазначено у статті [3], до цього часу (2018 р.) визначення відносного положення на близькій відстані все ще залишається відкритим напрямком досліджень, особливо це стосується некооперованих об'єктів (цілей) сервісного обслуговування. Відмічалося, що цій проблемі присвячено мало публікацій. Представляє інтерес дослідити, як виглядає цей напрямок досліджень на сьогодні, враховуючи результати, що викладені у публікаціях останнього часу. Задача даного дослідження – визначення придатності описуваних методів оцінювання відносного просторового положення об'єкта до застосування їх не тільки для випадку некооперованої цілі, але й для випадку невідомої цілі (тобто коли відсутня її геометрична модель або модель її ознак). Було проаналізовано публікації, що наведені переважно у журналах Acta Astonautica та Aerospace Science and Technology, що охоплюють період з 2011 по 2022 роки. Метою даної праці є огляд стану проблеми визначення параметрів відносного руху об'єктів орбітального сервісу з акцентом на операції з некооперованими та невідомими цілями на близький відстані.

Поняття захоплення та відстеження. Загалом, оцінка просторового положення – це задача пошуку параметрів, які описують просторове переміщення (кутовий рух та поступальне переміщення) між системою відліку датчика і системою відліку цілі [4]. Процес рішення задачі містить два основні кроки: ініціалізація просторового положення (або захоплення цілі), тобто початкове отримання положення, та подальше відстеження положення цілі. Ініціалізація положення здійснюється, коли отримано перший набір вимірюваних даних і немає попередньої інформації про просторове положення цілі. Відстеження положення є кроком, який дозволяє оновлювати параметри положення цілі на основі попередньо оцінених, у міру проведення нових вимірювань. Найкращий спосіб на випадок некооперованих цілей – це застосувати методи на основі моделі, які обчислюють положення шляхом порівняння особливостей, або ознак, цілі, витягнутих з доступних даних, з тими ж характеристиками у тривимірній моделі цілі, яка зберігається на борту. Як зауважено у [4], ці методи можна розділити на методи відповідності (або зіставлення) шаблонів (template matching), що придатні для ініціалізації просторового положення, і ітераційні методи, які мінімізують функцію помилки, придатні для відстеження положення. У випадку методів зіставлення шаблонів, 3D-модель використовується для створення набору шаблонів зображень цілі з різних точок зору. Обмеженням цих методів ініціалізації є високе обчислювальне навантаження, тому наголошується на необхідності подальших досліджень в цьому напрямку.

Кооперовані та некооперовані місії. Місії орбітального сервісу з точки зору забезпечення виконання операцій, як зазначено, наприклад, у [5], можна поділити на два типи – кооперовані та некооперовані. При кооперованому підході цільовий космічний апарат (той, що обслуговується) надає допомогу сервісному апарату, зокрема у проблемі визначення свого відносного положення. Це може бути забезпечено наявністю на цілі міток – спеціального маркування або світловідбивачів, або наявністю та можливістю передачі даних телеметрії. Некооперовані цілі не забезпечені кооперованими мітками і попередня інформація про стан положення не може бути отримана. Підходи до некооперованої оцінки просторового положення цільового апарата можна поділити на підходи на основі наявності та на підходи без наявності 3D моделі цільового апарата. Існують також гібридні підходи, які використовують алгоритми без моделі для отримання початкового положення, а потім процеси на основі моделі для відстеження.

Модельні та безмодельні підходи до оцінювання просторового положення. Приклади застосування та характеристика методів оцінювання просторового положення як тих, що основані на наявності на борту 3D моделі цілі (model-based pose estimation), так і тих, що вільні від використання відомої 3D моделі цілі (model-free pose estimation), наведено у статті [5] 2019 р. Зауважимо, що англомовний термін "pose" означає просторове положення, тобто комбінацію позиції та орієнтації у просторі.

Методи на основі відомої 3D моделі цілі. У [5] , зокрема, згадується модуль Raven системи відносної навігації, який оснащений інфрачервоною відеокамерою і пульсуючим лідаром (flash-лідаром). При опрацюванні двомірних зображень цілі, отриманих відеокамерою, виявляються краї зображення цілі. Потім зображення зіставляється з проєкціями тривимірної моделі цілі. Похибки між краями проєкції моделі та краями зображення датчика мінімізуються за допомогою методу найменших квадратів, що дозволяє визначити просторове положення цілі. Алгоритм опрацювання даних відеокамери є чутливим до умов освітлення. При опрацюванні тривимірних координат точок хмари (дані, отримані з лідара) використовується ітеративний алгоритм найближчої точки (ICP – Iterative closest point), в процесі використання якого мінімізується середньоквадратична похибка між хмарою точок та 3D моделлю цілі.

Приклади досліджень, проведених з метою розробки алгоритмів оцінки просторового положення з використанням даних хмари точок, заснованих насамперед на алгоритмі ICP, описані у роботах [4], [6]. Одним із загальних недоліків алгоритмів на основі моделі є те, що вони вимагають використання внутрішньо збереженої моделі цілі, створеної апріорі.

Методи вільні від використання відомої 3D моделі цілі. Як відзначено у [5], 3D моделі цілі можна створювати на орбіті шляхом зйомки та обробки серії зображень, але цей процес потребує відносно багато часу. Тому пропонується розробити метод оцінки просторового положення, який не вимагає внутрішньо збереженої геометричної моделі, а покладається на ознаки, що витягнуті із даних зображення датчика.

У [7] виконано безмодельну оцінку просторового положення, використовуючи змодельовані зображення двох спільних відеокамер. В якості об'єкта, що розпізнається, вибирається прямокутний конструктивний елемент, який, як вважається, є поширеним у конфігураціях супутників. Для оцінки положення використовуються координати кутів об'єкта – прямокутника. У роботі [8] проведено оцінювання просторового положення, використовуючи ознаки (кривизна, нормалі тощо), що витягнуті з даних тривимірної хмари точок цілі, і багаточастковий фільтр. Зауважено, що початкові експериментальні результати були обмежені оцінкою поступальних рухів.

Як зазначено у [5], тривимірна природа даних хмари точок лідара є сприятливою для безмодельної оцінки положення цілі.

Категорії методів вимірювання. Методи вимірювання, згідно з [8] 2017 р., поділяються на три категорії: методи на основі зору (монокулярне та стереобачення), на основі структурованого світла та на використанні лідара. Із швидким розвитком пристроїв отримання тривимірної хмари точок дослідження методів некооперованого відстеження положення цілі на основі ознак хмари стає все більш нагальним.

Методи на основі монокулярного зору. Монокулярний зір простий у реалізації та недорогий у обчислювальному відношенні в порівнянні з іншими методами, але його можна використовувати для вилучення координат глибини точки лише за наявності певних знань про ціль [9]. Потрібен деякий опис розміру цілі або чітка карта попередньо визначених ознак та їх положення на цілі. Це ідеальний вибір для випадку кооперованої або відомої цілі [9]. Припускається, що цей метод не може бути застосований під час роботи з невідомими цілями У статті [10] проводиться порівняння методів ініціалізації положення некооперованої цілі для випадку застосування відеосистеми з монокулярним датчиком на основі мінімальної кількості ознак відомої моделі цілі.

Методи на основі стереобачення. Для захоплення цілі широко застосовуються [11] блоки відеокамер через їх відносно низьку вартість, малу вагу та низьке споживання енергії. Засвоєні останнім часом методи дозволяють досягти високої точності в оцінці положення цілі з відомими моделями при великій базовій лінії між камерами. В роботі зазначається, що оскільки попередню інформацію про невідомі об'єкти не можна отримати заздалегідь, традиційні підходи, що спираються на виділення та відповідність ознак, все ще є основними методами оцінки відносного просторового положення.

Методи на основі лідара. Метод вимірювання, заснований на використанні лідара (прилад на основі технології отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища відбиття світла), часто використовується у відносній космічній навігації як метод, що може надавати точну тривимірну інформацію, і є стійким до змін освітлення. Так, наприклад, у роботі [12] представлено підхід до оцінки положення цілі за допомогою камер на основі фотонних змішувальних пристроїв PMD (Photonic Mixer Devices). Алгоритм працює в режимі онлайн, використовуючи інформацію про амплітуду та глибину, надану камерою при високій частоті кадрів. Однак методи вимірювання на основі лідара мають недоліки, зокрема, низьку роздільну здатність і шум вимірювання.

Методи на основі сумісних приладів. Для визначення просторового положення цілі при операції наближення у роботі [13] запропоновано сенсорну систему, що використовує тривимірну TOF камеру часу прольоту (TOF – Time-of-Flight) з датчиком PMD для отримання інформації про дальність у поєднанні з відеокамерою з високою роздільною здатністю у відтінках сірого, що використовує датчик CCD (Charge-coupled device – прилад із зарядовим зв'язком). Датчик CCD забезпечує вимірювання яскравості/відтінків сірого, а датчик PMD – дальності. Обидва датчики мають певні переваги. Камера з високою роздільною здатністю добре визначає положення об'єкта в площині зображення, а отримати хорошу оцінку відстані досить важко. На відміну від цього, датчик дальності може безпосередньо вимірювати відстань до об'єкта, але він не може добре визначити положення в площині зображення через його, як правило, низьку бічну роздільну здатність.

Цікавим є дослідження [14] 2018 р. У цій роботі ціль не є кооперованою, форма та кінематичний стан якої невідомі. Сервісний апарат оснащений двома датчиками: монокулярною камерою та датчиком відстані. Тут мається на увазі відстань між апаратом і однією точкою цілі – точкою перетину між поверхнею цілі та вектором її відносного положення. Отримані монокуляром зображення обробляються наступним чином. Витягуються ознаки із поточного кадру зображення, порівнюються отримані з поточного кадру дескриптори ознак (тобто структури опису ознак об'єкта), з дескрипторами ознак попереднього кадру через процес зіставлення. Ці кроки відбуваються за допомогою відомих методів обробки двомірних зображень. Потім 2D координати на площині зображення отриманих пар збігу використовуються у фільтрі для оцінки руху відповідних 3D точок.

TOF камери як засіб вимірювання. Типові рішення [14] отримання 3D сценарію включають монокулярні камери, далекоміри (як радіочастотні, так і лідари), а також удосконалене обладнання, як TOF камери, стерео відеосистеми, радари та flash-лідари. TOF камери – часопролітні камери – пристрої для відображення дальності, що використовують методи часу прольоту для визначення відстані між камерою та поверхнею об'єкта для кожної точки її зображення. Кожен піксель датчика зображення камери TOF вимірює час, який потрібен світлу для проходження від блоку освітлення (лазера або світлодіода) до поверхні об'єкта та назад до матриці у фокальній площині. Для позначення цих пристроїв окрім терміну TOF камера, використовують й інші – камери Range IMaging, камери 3D-дальності, камери дальності або комбінацією згаданих термінів [15]. Така технологія стала можливою завдяки розвитку напівпровідникової технології. Результатом є можливість вимірювання відстані для кожного пікселя на високій швидкості.

Для визначення часу прольоту використовується кілька різних підходів:

– вимірювання фазового зсуву високочастотно-модульованого сигналу джерела світла. Наприклад камера SR-4000 модулює випромінювання світлодіодів на кілька десятків мегагерц, а її CCD/CMOS датчик зображення вимірює фазу відбитого модульованого сигналу в кожному пікселі, камера PMD CamCube 3.0 працює з датчиком зображення – так званим фотонним змішувальним пристроєм PMD на основі стандартної технології CMOS;

– вимірювання дальності за допомогою стробування. Сканери дальності зі стробуванням (Range gated imagers) мають вбудований у датчик зображення електронний затвор, який відкривається та закривається з тією ж швидкістю, що й світлові імпульси. Кількість отриманого світла залежить від відстані, яку подолав імпульс, оскільки частина кожного зворотного імпульсу блокується затвором відповідно до часу його надходження;

– пряме вимірювання часу прольоту. Ці пристрої вимірюють саме час проходження лазерного імпульсу й дозволяють обробляти інформацію в режимі реального часу. Цей підхід був продемонстрований для операцій місії з поверненням OSIRIS-REx Bennu для відбору проб астероїда [16]. Відомими прикладами цих пристроїв є камери 3D Flash LIDAR, де у якості датчиків використовуються масиви лавинних фотодіодів або PIN-фотодетекторів.

У роботах [17], [12] представлено підхід для оцінки положення невідомого об'єкта за допомогою камер на основі фотонних змішувачів. Використання 3D-зображення, створене камерою PMD, забезпечує основу для виявлення та прогнозування руху на близькій відстані. Датчик PMD забезпечує три канали даних: амплітуду, інтенсивність і відстань. За цими даними виявляються ознаки, що зіставляються з ознаками моделі. До зіставлених ознак (до координат їх розташування відповідно в системі координат датчика і в системі координат моделі) застосовується алгоритм ICP.

Характеристики датчиків, використаних у дослідженнях, можна знайти, зокрема, у публікаціях [2], [5], [6], [12], [17], [18] і [19], що охоплюють період з 2011 до 2021 роки. Зауважимо лише, що роздільна здатність датчиків становила від 160 x 120 пікселів розміром 40 x 40 мкм до 320 x 240 пікселів розміром 20 x 20 мкм.

Методи визначення просторового положення за даними вимірювань на основі ознак. Методи визначення просторового положення різноманітні, але зазвичай поділяються на дві категорії [20]: на основі ознак і на основі форми. Оцінка на основі ознак використовує відмінні особливості цілі, виявлені за даними сенсорної системи, зіставляючи з відповідними особливостями еталонного (модельного) об'єкта. Це можуть бути краї, кути, деталі текстури або спеціально розроблені мітки. Модельний об'єкт — це деяка база даних ознак об'єктів та даних їх розташування на об'єкті. Зіставляючи лінійне положення та орієнтацію цілі з положенням та орієнтацію моделі забезпечують оцінку просторового положення.

У статті [17] для випадку використання камери PMD, для якої у порівнянні з 2D датчиками CCD/CMOS характерна низька роздільна здатність зображення, розроблено алгоритм оцінки просторового положення, заснований на інваріантних ознаках, які зазвичай використовуються для зіставлення зображень із високою роздільною здатністю. Розроблено дескриптор ознак, який використовує інформацію в околицях характерних точок з усіх наявних каналів даних: амплітуди, інтенсивності і відстані. Запропонований дескриптор має інваріантність до яскравості, контрасту, масштабу, до 3D-перетворень. Припускається, що ознаки витягуються з площин поверхні тривимірних об'єктів, визначаються опорні вектори цих площин, і за їх ознак витягують дескриптор.

У статті [12] представлено підхід для оцінки просторового положення об'єкта за допомогою TOF камер на основі фотонних змішувачів PMD. У [17] надано широке дослідження можливостей використання камери PMD у процесі визначення просторового положення цілі. У роботі [17] подібна проблема вирішувалась з використанням алгоритму витягу ознак, зокрема модифікованої версії SURF (Speeded Up Robust Features). У [12] спеціально розроблений алгоритм для роботи з камерою PMD працює в режимі онлайн, не вимагає попередньої оцінки просторового положення цілі. Алгоритм застосовує метод головних компонент PCA (principal component analysis), щоб виділити площину на поверхні цілі. Використовуючи підгонку за методом найменших квадратів просторового положення площини до її відомого розташування на поверхні цілі, встановлюється просторове положення цілі. Алгоритм працює за деяких припущень щодо геометрії об'єкта, наприклад, що ціль містить межі, які є прямими лініями (під час визначення меж) і що його поверхні є плоскими (під час виконання підгонки площини за методом найменших квадратів). Проведені наземні експерименти підтверджують ефективність алгоритму. Одним з незавершених аспектів роботи є виявлення здатності алгоритму мати справу з невідомими цілями.

У роботі [13] розглядається використання сенсорної системи, що дозволяє отримати 3D зображення з TOF камери і зображення високої роздільної здатності з монокамери з CCD. Основна ідея реалізації сенсорної системи полягає в тому, що замість об'єднання діапазонного зображення TOF камери з зображенням яскравості з монокамери з CCD, злиття даних датчиків виконується лише в процесі оцінювання положення. Припускається, що початкова оцінка просторового положення цілі відома.

У роботі [21] продемонстровано рішення задачі визначення відносного просторового положення при зближенні космічних апаратів з використанням хмар точок, отриманих датчиком на основі лідара. В роботі продемонстровано недостатність використання одного лише алгоритму ICP як методу визначення просторового положення. Запропоновано використання методу зіставлення ознак отриманої хмари точок з бібліотекою ознак моделі (для різних положенбь цілі), а саме методу OUR-CVFH (Oriented, Unique and Repeatable Clustered Viewpoint Feature Histogram) [22], що не вимагає початкової оцінки положення і уточнює результати оцінювання за допомогою алгоритму ICP. Наголошується, що цей підхід має таку саму складність під час виконання, що й використання алгоритму ICP. Він використовує ознаки виділених гладких областей (названих кластерами) видимої поверхні цілі, наприклад, такі як середня нормаль кластера, прив'язаний до центроїда кластера репер Дарбу та інші. При обчисленні репера використовуються власні вектори зваженої матриці розсіювання (scatter matrix)

$$\mathrm{M} = \omega \sum_{k \in C} (D - d_{\mathrm{k}})(\mathrm{p}_{\mathrm{k}} - \mathrm{c})(\mathrm{p}_{\mathrm{k}} - \mathrm{c})^T \ , \quad \omega = 1 / \sum_{k \in C} (D - d_{\mathrm{k}}) \ ,$$

де d_{k} є евклідова відстань між k -тою точкою p_{k} кластеру C та його центроїдом c , D – максимальне значення d_{k} для точок кластеру.

Алгоритм оцінки просторового положення без наявності 3D-моделі цілі за даними у вигляді хмари точок, отриманих за допомогою flash-лідара, представлено у [5] 2019 р. Алгоритм вдосконалений порівняно з існуючими тим, що замість використання алгоритму сусідства Мура для виявлення ліній він використовує перетворення Гафа (Hough transform), яке здатне ідентифікувати лінії з артефактів датчиків. Представлений алгоритм покращує методи оцінки просторового положення без моделі, доповнюючи визначення краю визначенням орієнтації площини поверхні об'єкта (припускається, що ціль містить прямокутний елемент). Вектор нормалі площини забезпечує більш надійну та точну оцінку орієнтації цілі. Автори статті зауважили, що при проведені дослідження було прийняте припущення, що поверхня цілі складається з прямих ліній і плоских поверхонь, хоча конкретна геометрична модель цілі не використовувалася для оцінки положення.

У роботі [23] 2022 р. досліджується проблема визначення відносного просторового положення великомасштабної некоопераваної обертової цілі. З погляду на те, що ціль не може бути повністю захоплена датчиками на надкороткій відстані через її великі розміри, пропонується підхід, заснований на сумісному використанні 2D даних монокулярної відеокамери і 3D даних лідара – хмари точок. Припускається, що форма цілі представлена або може бути апроксимована певним багатогранником з вісьмома вершинами. При цьому наголошується, що такий багатогранник є типовою геометрією для невеликого астероїда, який можна охарактеризувати як некоопeровану ціль під час місій дослідження глибокого космосу. З метою підвищення ефективності обробки даних лідара розроблено алгоритм VLPCS (Vision–aided Lidar Point Cloud Segmentation) сегментації хмари точок, тобто їх розподілу між гранями поверхні цілі, з використанням даних монокамери. Після цього використовується чисто геометричний підхід для визначення просторового положення цілі, який є стійким до помилок датчиків. Геометричне розпізнавання цілі виконується на основі підходу одночасної локалізації та відображення SLAM (Simultaneous Localization And Mapping).

Застосовувані ознаки

Ознаки двомірних зображень. У [11] 2021 р. наводиться характеристика основаних на моно та стереобаченні існуючих методів оцінювання відносного положення відповідно до типу використовуваних ознак. Їх можна поділити на три категорії: методи на основі еліпса, лінії та точки. Методи на основі еліпсів оцінюють положення цілі за зміною великої півосі. Підходи на основі ліній, що виділяються за допомогою детекторів країв, оцінюють відносне положення за відповідністю ліній. Практичне застосування еліптичних і лінійних ознак має обмеження. Зокрема методи на основі еліпсів не дають інформації про кут крену. Методи на основі ліній мають труднощі виділення стабільних ліній за наявності оклюзії. Тому, як наголошується у [11], оцінка відносного положення на основі точкових ознак має особливе значення. Є три основні кроки в методах на основі точок. По-перше, з кожного зображення виділяються так звані ключові точки. Потім генеруються дескриптори для математичного представлення ключових точок через деякі специфічні характеристики сусідніх значень пікселів. Потім можна оцінити відносну матрицю перетворення двох зображень. Точкові методи підходять для оцінки відносних змін положення в послідовних зображеннях.

У статті [24] 2020 р., де пропонується одночасна оцінка просторового положення та форми невідомого об’єкта на основі двомірних зображень монокулярної камери, використано відомі алгоритми виявлення ознак, що передаються як вхідні дані до фільтра оцінювання. Характеристику методів виявлення ознак з двомірних зображень наведено зокрема в роботі [25]. У [24] також наведено коротку характеристику методів виявлення ознак з двомірних зображень щодо застосування до космічних апаратів.

Ознаки хмари точок. Сусідство, кривизна, зміна кута нормалі. Прикладами ознак хмари точок можуть служити ознаки, що використані у роботі [8], де на основі ознак хмари точок запропоновано метод некооперованого відстеження просторового положення цілі. Мова йде про такі поняття, як кривизна, щільність, нормаль. Для кожної точки даних у моделі хмари точок найближчі декілька (k) точок даних визначаються як точки сусідства (околиця). Щільність характеризується середньою відстанню точок сусідства. Середня відстань ω_{nb} між кожною точкою даних та точками її околиці відображає особливості моделі. Важливою основою для розпізнавання поверхні є інформація про кривизну. Гострі краї моделі мають відносно велику кривизну, тоді як гладкі ділянки поверхні моделі мають відносно невелику кривизну. Оцінку нормалі та кривизни i -тої точки даних отримують шляхом аналізу матриці C_i коваріації k точок її околиці:

$$C_i = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{i1} - \overline{\mathbf{g}}_i \\ \cdots \\ \mathbf{g}_{ik} - \overline{\mathbf{g}}_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{i1} - \overline{\mathbf{g}}_i \\ \cdots \\ \mathbf{g}_{ik} - \overline{\mathbf{g}}_i \end{bmatrix},$$

де $\overline{\mathbf{g}}_i$ – стовпчик координат центра точок оточення точки g_i, $\mathbf{g}_{ij}$– стовпчик координат j -тої сусідньої точки оточення точки g_i. Тоді можна обчислити три власні значення матриці $\lambda_1 \le \lambda_2 \le \lambda_3$ та відповідні одиничні власні вектори e_1, e_2, e_3. Тоді нормаль n_1 вершини (точки) g_i дорівнює e_1. Оцінка кривизни H_i може бути виражена так:

$$H_i = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3).$$

Зміна кута нормалі також є важливим показником вимірювання поверхні. Кут ω_α між точкою даних і її сусідніми точками обчислюється шляхом підсумовування всіх “нормальних” кутів серед точок її сусідства.

На основі цих ознак вводиться інтегрований параметр ω, що має вигляд

$$\omega(g_i) = (\lambda_H H_i + \omega_\alpha(g_i)) / \lambda_n \omega_{nb}(g_i),$$

де λ_H – коефіцієнт кривизни, λ_n – коефіцієнт відстані, що задаються.

Чим більше кривизна, чим більший “нормальний” кут, тим імовірніше, що точки даних є характерними точками поверхні, тому кривизна і нормальний кут пропорційні параметру ознаки. Чим більше середня відстань, тим менша ймовірність, що точки даних є характерною точкою, тому середня відстань обернено пропорційна параметру ознак. Значення параметрів ознак безпосередньо відображає, чи є точка даних характерною, тобто ключовою.

Методи визначення просторового положення за даними вимірювань на основі форми. Оцінка просторового положення на основі форми не визначає певні особливості об’єкта. Оцінка просторового положення відбувається шляхом зіставлення модельного об’єкта з даними датчика таким чином, щоб мінімізувати відхилення між еталонним об’єктом і даними щодо цілі. У методах, заснованих на формі, модельний об’єкт представляє всю форму, наприклад, модель CAD. Розраховуються відхилення між моделлю та даними вимірювань. Просторове положення ітераційно коригується, доки міру відповідності (наприклад, середній квадрат відхилень, максимальне відхилення, середнє відхилення) не буде мінімізовано.

Задачу відтворення форми цілі – корпусу розгінного ступеня ракети-носія, за наявною хмарою точок поверхні, що змодельовано з припущенням використання TOF камери з PMD датчиком, розглянуто у статті [6] 2017 р. Прийнято, що CAD модель корпусу є відомою. Для вирішення задачі враховується, що очікуване тіло має циліндричну форму відомого радіуса з рядом додатків (обтічники, бічні баки) і соплом на одному з двох кінців. Початковою інформацією, яку пропонується отримати, є вісь симетрії циліндричного тіла. Це досягається виділенням векторів нормалі кожного патчу, тобто підмножині хмари точок, та застосування алгоритму оцінки осі циліндра. Потім знаходять барицентр циліндра як середню точку цієї осі. Ідентифікація сопла відбувається шляхом виділення сферичної області з центром, розташованим уздовж циліндричної осі на заданій відстані від барицентру. Після видалення з хмари тих точок, які пов'язані з основним корпусом і соплом, бічні баки визначаються за тією ж схемою, що основний циліндр корпусу. Описана процедура відтворення геометрії цілі використовує лише геометричні характеристики примітивних форм (циліндри, плоскі структури тощо), уникаючи використання навчальних баз даних та/або процедур розпізнавання об'єктів. Метод відстеження, заснований на реєстрації послідовних хмар точок, потім запускається паралельно з розширеним фільтром Калмана для відстеження повної кінематики цілі.

Без використання ознак хмари точок для визначення кутового положення найчастіше використовують ітеративний алгоритм найближчої точки ICP, що мінімізує евклідову відстань найближчих точок. Але для некооперованих цілей із невеликим відносним рухом важко точно оцінити положення, використовуючи лише цей алгоритм. У [2] 2021 р. представлено новий метод на основі розширеного фільтра Калмана EKF (extended Kalman filter) для виконання 6D відносної навігації без розпізнавання ознак хмари точок. Пропонується алгоритм реєстрації хмари точок CMT (Covariance Matrix Transform algorithm), заснований на перетворенні коваріаційної матриці, та розроблено схему оцінки стану для некооперованих цілей. Метод використовує різницю між коваріаційними матрицями точок хмари до та після переміщення цілі, що відповідають часу отримання сусідніх кадрів, з метою оцінки відносного руху. Матриця C коваріації точки P визначається співвідношеннями

$$\mathrm{C} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\xi_{\mathrm{k}}(\mathrm{P_k} - \overline{\mathrm{P}})(\mathrm{P_k} - \overline{\mathrm{P}})^T, \quad \overline{\mathrm{P}} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{P_k}, \quad \xi_{\mathrm{k}} = 1/\left\|\mathrm{P_k} - \overline{\mathrm{P}}\right\|,$$

де $\mathrm{P_k}$ стовпчик координат k-тої сусідньої до P точки, n – задана кількість сусідніх точок. Припускається, що коваріаційна матриця $\tilde{\mathrm{C}}$ цієї ж точки для сусіднього кадру пов'язана з коваріаційною матрицею C співвідношенням $\mathrm{C} = \mathrm{R}\tilde{\mathrm{C}}\mathrm{R}^{\mathrm{T}}$, де R є матрицею повороту відповідно між двома кадрами.

Матрицю повороту знаходять як оптимальний нелінійний розв'язок R^* нелінійної задачі найменших квадратів

$$\mathrm{R}^* \to \min\sum_{k=1}^{3m} f_{\mathrm{k}}(\mathrm{R}), \quad f_{\mathrm{k}}(\mathrm{R}) = \left\|\mathrm{R}\tilde{\mathrm{C}}_{\mathrm{k}}\mathrm{R}^{\mathrm{T}}\mathrm{n_k} - \lambda_{\mathrm{k}}\mathrm{n_k}\right\|^2,$$

де λ і n – відповідно власні значення та вектори матриці C, m – кількість пар матриць, що зіставляються. Основна перевага цього методу, за твердженням авторів, полягає в тому, що стан некооперованих цілей можна оцінювати без виявлення та розпізнавання ознак хмари точок.

Особливості оцінювання просторового положення

Мінімізація помилки вирівнювання хмар точок. З використанням алгебри кватерніонів у статті [7] 2011 р. показано, як формується вимога мінімізації помилки вирівнювання двох хмар точок за методом найменших квадратів, що приводить до задачі знаходження власного вектора матриці, побудованій на виміряних координатах пар відповідних точок хмар. Власний вектор матриці, який відповідає найменшому власному значенню, розглядається як кватерніон повороту, що суміщає одне просторове положення цілі з іншим просторовим положенням відносно космічного апарата.

Методи фільтрації. У роботі [26] 2018 р. зауважено, що для покращення оцінки положення на основі відеосистем необхідним є застосування методів фільтрації. У цій роботі досліджується можливість використання потенційно перспективних алгоритмів нелінійної фільтрації для покращення продуктивності методів на основі зору.

У роботі [14] відмічається, що досі (2018 рік) не існує надійних методів щодо використання наборів узгоджених ознак для оцінки відносного положення між датчиком та ціллю. Увага сконцентрована на дослідженні ефективності фільтра на основі схеми сигма-точкового фільтра Калмана (UKF – unscented Kalman filter), який використовує 2D координати ознак і вимірювану дальність як вхідні вектори спостереження, і повертає форму, відносні лінійне і кутове положення і швидкості цілі. Особливістю запропонованого фільтра є те, що у крок оцінки додано алгоритм сортування та відстеження ознак. Це пов’язано з тим, що в процесі вимірювання і оцінювання відбувається зміна кількості видимих ознак між кадрами зображення, коли ознаки зникають, наприклад, через обертання цілі, а потім з’являються знову.

Засновану на одній пасивній камері архітектуру для реконструкції відносного стану відомої цілі, яка не співпрацює, представлено в [27] 2018 р. Інноваційні аспекти статті стосуються, зокрема, схеми фільтрації. Для оцінки поступального руху представлено мінімаксний фільтр H_∞. Вибір такого фільтра зумовлений тим, що при оптичних вимірюваннях припущення, прийняті при застосуванні фільтра Калмана, зазвичай не виконуються. Ця та інші обставини призводять до вибору робастного підходу, а не оптимального. Для оцінки обертального руху реалізовано мінімальний енергетичний фільтр другого порядку, адаптований до задачі оцінки відносного стану.

У дослідженні [28] застосовано метод оцінки параметрів положення та орієнтації цілі, яка не співпрацює, за допомогою комп’ютерного зору. Визначення положення базується на інформативних ознаках зображень із застосуванням машинного навчання, що знижує обчислювальну складність реалізації алгоритму. Застосовано гарантований алгоритм еліпсоїдальної фільтрації. За рахунок включення рівнянь руху досягаються високоточні оцінки параметрів взаємного руху.

Передбачення у часі координат витягнутих ознак. У статті [9] 2020 р. досліджується система оцінки положення на основі стереобачення. Підкреслюється, що розширений фільтр Калмана є найбільш застосованим для нелінійної оцінки стану з використанням систем на основі зору. На кожному кроці процедури фільтра набори вимірювань створюються шляхом передбачення у часі координат витягнутих ознак з використанням оцінок кутових та лінійних швидкостей цілі. Для кожного кроку часу недоступні для спостереження внаслідок оклюзії ознаки не попадають до набору вимірювань. Проблема оцінки просторового положення вирішується за допомогою алгоритму EKF-SLAM [29]. Для реалізації оцінювання в реальному часі необхідна онлайнова інтеграція алгоритмів обробки та відстеження зображень.

Фільтр Калмана високого порядку, заснований на диференціальній алгебрі. У статті [30] 2019 р. зазначається, що оцінка відносного положення вимагає навігаційних систем, заснованих на методах фільтрації, здатних виконати точну оцінку траєкторії за дуже короткий проміжок часу. Одним з найбільш використовуваних алгоритмів оцінювання є розширений фільтр Калмана, який заснований на лінеаризації рівнянь руху та вимірювання за допомогою розкладання відповідних залежностей у ряд Тейлора першого порядку, що в деяких випадках призводить до помилок. Інший підхід – беззапаховий фільтр Калмана (UKF) – не використовує лінеаризацію, однак UKF часто повільніший, ніж EKF. Шляхом врахування членів ряду Тейлора вищого порядку було розроблено нелінійний фільтр – розширений числовий фільтр Калмана вищого порядку (HNEKF) – точніший, ніж EKF. Однак HNEKF вимагає отримання так званих тензорів високого порядку, що у багатьох випадках ускладнює його використання. Автори [30] запропонували вирішення проблеми за допомогою застосування методів диференціальної алгебри. Було показано, що фільтр другого порядку перевершує класичний аналог першого порядку або щодо відносно великих початкових помилок і невизначеностей, або для відносно низьких частот збору даних.

Технології глибокого навчання. У роботі [31] представлено новий підхід, який застосовує технології глибокого навчання до проблеми визначення положення фрагмента космічного сміття з апріорі невідомою геометрією. Розроблено згорткову нейронну мережу, яка виявляє та відстежує корисні орієнтири зображення за даними датчиків після навчання на синтетичних наборах візуальних даних, даних лідар або RGB-D (кольорові 3D зображення у вигляді хмари точок, тобто дані, отримані 3D-камерою, поєднуються з даними кольорової 2D камери). Як стверджують автори, представлений у роботі підхід до виділення ознак на основі нейронної мережі здатний вивчати більше корисних ознак зображення, ніж звичайні підходи, що робить цей метод потенційною альтернативою широко використовуваному ітераційному алгоритму найближчої точки.

Висновки. За результатами аналізу публікацій останнього десятиліття, присвячених проблемі визначення параметрів відносного руху об'єктів орбітального сервісу, можна зробити наступні висновки.

Визначення відносного просторового положення некооперованого (що не співпрацює) орбітального об'єкта (цілі) на основі відеосистем є класичним підходом завдяки перевагам малої ваги та низького споживання енергії. Алгоритми оцінки просторового положення на основі відеокамери зазвичай вимагають попереднього знання особливостей (ознак) цілі, потребують складних обчислень, на їх працездатність впливають умови освітлення. Основними методами оцінки відносного просторового положення залишаються традиційні підходи, що спираються на виділення та відповідність ознак зображення для послідовних кадрів або з моделлю цілі.

Ще одним основним підходом для визначення відносного положення є навігація на основі датчиків лідар, де поширеними методами є розпізнавання та відповідність ознак на основі отриманої лідаром хмари точок поверхні цілі, зазвичай з використанням ітераційного алгоритму найближчої точки (ICP – Iterative closest point). Останнім часом намітилась тенденція до розвитку неознакових методів визначення просторового положення цілі, у тому числі, невідомої. Дослідження також показують, що тривимірна природа даних хмари точок лідара є сприятливою для оцінки положення без наявності моделі цілі.

Стосовно придатності описуваних у публікаціях методів оцінювання просторового положення цілі до їх застосування у випадку невідомої цілі відзначається, що реалізація очевидного підходу, заснованого на створенні тривимірної моделі цілі на орбіті шляхом обробки серії зображень, що передує процесу оцінювання її просторового руху, потребує багато часу, що може бути критичним в операціях безпосередньої близькості. Тенденцією оцінювання просторового положення цілі є розробка методів одночасної оцінки просторового положення та форми невідомого об'єкта. Загалом випадок невідомого об'єкта на даний час не є дослідженим у повній мірі.

1. *Wei-Jie Li, Da-Yi Cheng, Xi-Gang Liu, Yao-Bing Wang, Wen-Hua Shi, Zi-Xin Tang, Feng Gao, Fu-Ming Zeng, Hong-You Chai, Wen-Bo Luo, Qiang Cong, Zhen-Liang Gao.* On-orbit service (OOS) of spacecraft: A review of engineering developments. Progress in Aerospace Sciences. 2019. V. 108. P. 32–120. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.01.004
2. *Kang G., Zhang Q., Zhang H.* Pose estimation of a non-cooperative spacecraft without the detection and recognition of point cloud features. Acta Astronautica. 2021. V. 179. P. 569–580. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.013
3. *Zhao G., Xu S., Bo Y.* LiDAR-Based Non-Cooperative Tumbling Spacecraft Pose Tracking by Fusing Depth Maps and Point Clouds. Sensors. 2018. V. 18(10). P. 1–17. https://doi.org/10.3390/s18103432
4. *Opromolla R., Fasano G., Grass M.* Uncooperative pose estimation with a LIDAR-based system. Acta Astronautica. 2015. V. 110. P. 287–297. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.11.003
5. *Lim T. W., Oestreich C. E.* Model-free pose estimation using point cloud data. Acta Astronautica. 2019. V. 165. P. 298–311. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.007
6. *Martínez H. G., Giorgi G., Eissfeller B.* Pose estimation and tracking of non-cooperative rocket bodies using Time-of-Flight cameras. Acta Astronautica. 2017. V. 139. P. 165–175. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.07.002
7. *Barfoot T., Forbes J. R., Furgale P. T.* Pose estimation using linearized rotations and quaternion algebra. Acta Astronautica. 2011. V. 68. P. 101–112. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.049
8. *He Y, Liang B., Li S.* Non-cooperative spacecraft pose tracking based on point cloud feature. Acta Astronautica. 2017. V. 139. P. 213–221. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.06.021
9. *De Jongh W. C., Jordaan H. W., Van Daalen C. E.* Experiment for pose estimation of uncooperative space debris using stereo vision. Acta Astronautica. 2020. V. 168. P. 164–173. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.006
10. *Sharma S., D′Amico S.* Comparative assessment of techniques for initial pose estimation using monocular vision. Acta Astronautica. 2016. V. 123. P. 435–445. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.032
11. *Huang Y., Zhang Z., Zhang L., Gil-Fernández J.* A low-dimensional binary-based descriptor for unknown satellite relative pose estimation. Acta Astronautica. 2021. V. 181. P. 427–438. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.050
12. *Regoli L., Ravandoor K., Schmidt M., Schilling K.* On-line robust pose estimation for Rendezvous and Docking in space using photonic mixer devices. Acta Astronautica. 2014. V. 96. P. 159–165. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.12.005
13. *Tzschichholz T., Boge T., Schilling K.* Relative pose estimation of satellites using PMD-/CCD-sensor data fusion. Acta Astronautica. 2015. V. 109. P. 25–33. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.12.010
14. *Volpe R., Palmerini G. B., Sabatini M.* A passive camera based determination of a non-cooperative and unknown satellite's pose and shape. Acta Astronautica. 2018. V. 151. P. 805–817. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.061

15. *Piatti D.* Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction. Ph.D. Thesis. Politecnico Di Torino. Doctoral school of Environment and Territory. 2011. URL: https://www.academia.edu/500056/Time_of—_Flight_cameras_tests_calibration_and_multi_frame_registration_for_automatic_3D_object_reconstruction?email_work_card=view-paper (дата звернення: 22.09.2022).
16. ASC's 3D Flash LIDAR camera selected for OSIRIS-REx asteroid mission. NASASpaceFlight. com. URL: https://www.nasaspaceflight.com/2012/05/ascs-lidar-camera-osiris-rex-asteroid-mission/ (дата звернення: 22.09.2022).
17. *Tzschichholz T., Ma L., Schilling K.* Model-based spacecraft pose estimation and motion prediction using a photonic mixer device camera. Acta Astronautica. 2011. V. 68, Iss. 7–8. P. 1156–1167. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.10.003
18. *Lim T. W., Toombs A. J.* Pose Estimation Using a Flash Lidar. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics - National Harbor, Maryland. 13-17 January 2014. AIAA 2014-0089. https://doi.org/10.2514/6.2014-0089
19. *Lim T. W.* Point cloud modeling using the homogeneous transformation for non-cooperative pose estimation. Acta Astronautica. 2015. V. 111. P. 61–76. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.02.002
20. *English C., Okouneva G., Choudhuri A.* Shape-based Pose Estimation Evaluation using Expectivity Index Artifacts. PerMIS'12: Performance Metrics for Intelligent Systems. College Park Maryland. 20-22 March 2012. https://doi.org/10.1145/2393091.2393105
21. *J. O., Christian J. A.* LIDAR-based relative navigation with respect to non-cooperative objects. Acta Astronautica. 2016. V. 126. P. 298–311. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.05.007
22. *Aldoma A., Tombari F., Rusu R. B., Vincze M.* OUR-CVFH – Oriented, Unique and Repeatable Clustered Viewpoint Feature Histogram for Object Recognition and 6DOF Pose Estimation. Pattern Recognition - 2012. Lecture Notes in Computer Science. V.7476. Conference proceedings. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 113–122. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32717-9_12
23. *Zhu W., She Y., Hu J., Wang B., Mu J., Li S.* A hybrid relative navigation algorithm for a large–scale free tumbling non–cooperative target. 2022. V. 194. P. 114–125. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.028
24. *Capuano V., Kim K., Chung S. J.* Monocular-based pose determination of uncooperative space objects. Acta Astronautica. 2020. V. 166. P. 493–506. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.027
25. *Гончаренко М. О.* Сравнительный анализ методов формирования дескрипторов изображений в контексте задачи сегментации видеопотока. Бионика интеллекта. 2015. Т. 85, № 2. С. 90–94.
26. *Pesce V., Haydar M. F., Lavagna M., Lovera M.* Comparison of filtering techniques for relative attitude estimationofuncooperative space objects. Aerospace Science and Technology. 2019. V. 84. P. 318–328. https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.10.031
27. *Pesce V., Opromolla R., Grassi M.* Autonomous relative navigation around uncooperative spacecraft based on a single camera. Aerospace Science and Technology. 2019. V. 84. P. 1070–1080. https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.11.042
28. *Gubarev V. F., Salnikov N. N., Melnychuk S. V.* Ellipsoidal Pose Estimation of an Uncooperative Spacecraft from Video Image Data. In book: Control Systems: Theory and Applications Publisher: River Publishers. 2018. P. 169–195. https://doi.org/10.1201/9781003337706-9
29. *Li Y., Xie Y.* Relative state estimation of model-unknown spinning noncooperative target using stereo EKF-SLAM. 2017. 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China. 2017. P. 5893–5898. https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028291
30. *Cavenago F., Lizia P. D., Wittig A.* On-board spacecraft relative pose estimation with high-order extended Kalman filter. Acta Astronautica. 2019. V. 158. P. 55–67. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.11.020
31. *Guthrie B., Kim M., Urrutxua H., Hare J.* Image-based attitude determination of co-orbiting satellites using deep learning technologies. Aerospace Science and Technology. 2022. V. 120. 107232. https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107232

Received on March 3, 2023,
in final form on March 27, 2023